

# Magnetyczne metody diagnozowania stali napromieniowanych neutronami

## Magnetic methods of evaluation of neutron irradiated steels state

### Streszczenie

Opracowanie zawiera syntetyczną informację o stanie badań dotyczących rozwoju magnetycznych nieniszczących metod diagnozowania materiałów poddanych działaniu promieniowania neutronowego. We wstępie podane zostały podstawowe informacje o skutkach napromieniowania stali oraz o próbie Charpy'ego. Opisano cztery metody magnetycznego badania próbek stosowanych do testów Charpy'ego: metodę pomiaru kolejnych pętli histerezy, metodę adaptacyjnego doboru warunków magnesowania, metodę pomiaru efektu Barkhausena oraz metodę jednoczesnego badania kilku wielkości magnetycznych. Dla każdej metody podano przykład jej zastosowania.

### Abstract

Paper provides synthetic information about actual state of works on magnetic nondestructive methods proposed for evaluation of microstructure state of steels irradiated with neutrons. Introduction contains basic information about impact of neutrons on steel microstructure and about the Charpy's test. Than four following methods are presented: minor loops metod, magnetic adaptive test metod (MAT), Barkhausen effect method and Micro-magnetic – Multiparameter – Microstructure – Analysis (3MA) method.

### Wstęp

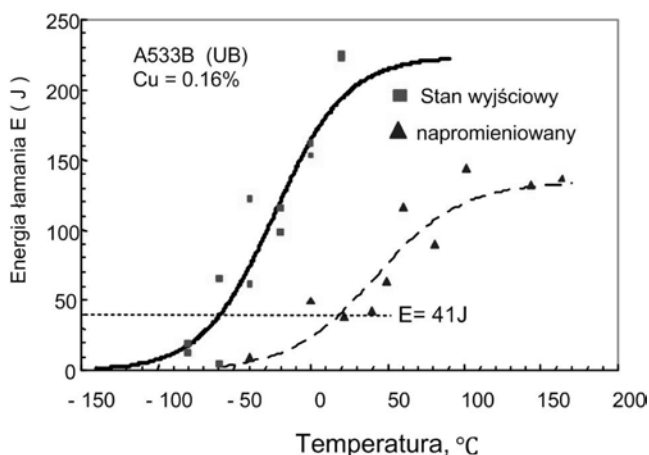
Diagnostyka stanu materiałów eksploatowanych w energetyce jądrowej jest zagadnieniem technicznym o dużym znaczeniu dla krajów wykorzystujących reaktory jądrowe. Nasz kraj zamierza stosować w nie-dalekiej przyszłości energię wytwarzaną w reaktorach jądrowych i przyjdzie się nam zmierzyć z wyzwaniem, jakim jest diagnostyka prewencyjna stanu elementów konstrukcyjnych bloku energetycznego, w tym szczególnie ścian reaktora. Należy podkreślić, że procesy degradacji struktury elementów konstrukcji poddanych działaniu wiązki neutronów (np. ścian kotła reaktora) różnią się od procesów degradacji zachodzących w stalach eksploatowanych w typowych kotłach elektrowni konwencjonalnych [1]. W przypadku materiałów napromieniowanych muszą być zmienione zasady wykonywania badań nieniszczących wykrywających nieciągłości. Wzrasta też znaczenie badań prewencyjnych,

dotyczących zmian w mikrostrukturze poprzedzających powstanie mikropęknięć. Przygotowanie kadry polskich inżynierów do diagnostyki urządzeń energetycznych poddanych działaniu promieniowania neutronowego to nowe i bardzo ważne wyzwanie, o czym świadczy np. dyskusja w środowisku inżynierów z SIMP podczas ostatniej 40. konferencji BN w Warszawie w 2011 r. [2] oraz w czasie konferencji Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych (DMiUT) w Gdańsku w 2012 r. [3]. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie syntetycznej informacji o stanie badań dotyczących rozwoju magnetycznych nieniszczących metod diagnozowania materiałów poddanych działaniu promieniowania neutronowego. Źródłem tych informacji są doniesienia literaturowe, a także referaty przedstawiane podczas dorocznych spotkań członków międzynarodowej grupy laboratoriów badań magnetycznych stowarzyszonych w sieci o nazwie Universal Network for Magnetic Non-Destructive Evaluation (UNMNDE) [4]. Autor i jego współpracownicy należą do tej organizacji i zajmują się magnetycznymi metodami diagnostyki zmian w mikrostrukturze stali eksploatowanych w energetyce konwencjonalnej.

**Dr hab. Bolesław Augustyniak** – Politechnika Gdańska.

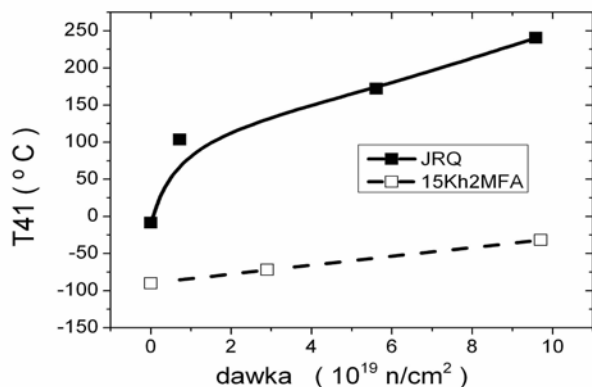
## Skutki napromieniowania i próba Charpy'ego

Obiektem o szczególnym znaczeniu w energetyce jądowej jest reaktor. Większość eksploatowanych aktualnie reaktorów w elektrowniach atomowych to reaktory typu LWR (*Light Water Reactor*). Kotły tych reaktorów (RPV) są chłodzone wodą o temperaturze ok. 290°C i ciśnieniu od 7 MPa w reaktorach typu BWR (*Boiling Water Reactors*) oraz do 14 MPa w reaktorach typu PWR (*Pressurized Water Reactors*). Zewnętrzne warstwy ścian kotła wykonane są głównie z niskostopowych stali ferrytycznych (w USA są to np. stale A302B, A533B) [5], a wewnętrzne ze stali austenitycznych lub stopów niklowych [6]. Głównym czynnikiem mającym wpływ na właściwości mechaniczne ścian kotła jest wysokoenergetyczne promieniowanie neutronowe (energia  $E > 1$  MeV). Skutki napromieniowania zależne są od dawki neutronów. Za miarę tej dawki przyjmuje się wartość iloczynu natężenia strumienia neutronów przez czas napromieniowania (*fluence*), liczony zatem jako ilość neutronów, które przeniknęły przez powierzchnię (np. 1 cm<sup>2</sup>) w zadany czas. Ocenia się, że dawki te po ok. 40 latach eksploatacji typowego reaktora osiągają wartości w przedziale



Rys. 1. Zmiany energii łamania dla stali A533 w stanie dostawy i po napromieniowaniu

Fig. 1. Changes in nominal energy for A533 steel as delivered and after irradiation



Rys. 2. Zależność temperatury T41 od dawki napromieniowania dla dwóch stali

Fig. 2. Dependence of the T41 temperature on irradiation dose for two steels

od  $0,5 \cdot 10^{19}$  do  $20 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> [6]. Według [5] dawki te to ok.  $3 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> dla reaktorów typu PWR oraz  $30 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> dla reaktorów typu BWR. Zmiany w mikrostrukturze stali spowodowane napromieniowaniem neutronami skutkują pogorszeniem właściwości mechanicznych. Efektem szczególnie niekorzystnym jest obniżenie odporności na pękanie (a tym samym zwiększenie kruchości). Zwiększa się także poziom naprężenia, powyżej którego następuje odkształcenie plastyczne w statycznej próbie rozciągania. Zmiany te są skutkiem blokady ruchu dyslokacji przez powstałe defekty punktowe i wydzielenia. Aktualnie diagnostyka stanu materiału reaktora polega głównie na pomiarze energii łamania próbek kontrolnych metodą Charpy'ego (PN-EN 10045-1) [1]. Pakiet próbek do testów Charpy'ego umieszczony jest w strefie promieniowania i ich liczba zmniejsza się w czasie eksploatacji reaktora. Na podstawie badań udarności w pewnym zakresie temperatury wykreśla się zależność energii łamania od temperatury –  $E(T)$ , a z niej wyznacza temperaturę przejściową kruchości (próg kruchości). Przyjmuje się temperaturę, w której  $E = 41$  J (T41) lub 54 J (T54). Tę temperaturę określa się też skrótem DBTT (*Ductil to Brittle Transition Temperature*).

Napromieniowanie neutronami powoduje systematyczne podniesienie temperatury przejścia w stan kruchy [1]. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań wykonanych dla stali A533B (Cu 0,16%) w stanie przed i po napromieniowaniu dawką o wartości  $6 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> [7]. Linia poziomą zaznaczono wartość energii łamania  $E = 41$  J. Można zauważyć, że napromieniowanie spowodowało wzrost temperatury przejścia (parametr T41) o ok. 80°C w zakres temperatur dodatnich. Zależność parametru E41 od wielkości dawki napromieniowania jest charakterystyczna dla danego gatunku stali. O dużych różnicach w tej zależności świadczą wyniki badań zebrane na rysunku 2 dla dwóch stali eksploatowanych w reaktorze [8].

## Opis magnetycznych metod badania próbek Charpy'ego

Ubywanie próbek kontrolnych do próby Charpy'ego w trakcie eksploatacji reaktora to ważki argument za stosowaniem badań nieniszczących dotyczących oceny zmian w mikrostrukturze (badania strukturoskopowe), mogących zastąpić próbę Charpy'ego. Z oczywistych względów zasadne jest także poszukiwanie metod badań nieniszczących strukturoskopowych umożliwiających bezpośrednie diagnozowanie elementów reaktora. W przypadku użycia do konstrukcji reaktora stali o właściwościach ferromagnetycznych (a takie są głównie stosowane) można i należy poszukiwać metod diagnozowania skojarzonych z badaniami właściwości magnetycznych tych stali, jako że właściwości te są uzależnione od mikrostruktury. Chodzi o zmiany wielkości domen magnetycznych (większe ziarno – większe domeny) oraz mobilność granic tych

domen podczas magnesowania (kotwiczenie przez defekty struktury typu wydzielenia oraz skupiska dyslokacji). Zmiany w mikrostrukturze wywołane napromienowaniem (powstanie wakansów oraz wydzieleni, a także zmiany w poziomie naprężeń wewnętrznych wokół tych obszarów) powinny być zatem również wykrywane w zmianach właściwości magnetycznych. To zagadnienie jest w centrum zainteresowania wielu laboratoriów magnetycznych pracujących w świecie na rzecz rozwoju magnetycznych metod diagnozowania stali napromieniowanych neutronami. Poniżej opisane wyniki badań dotyczą pomiarów laboratoryjnych właściwości próbek prostopadłościennych o geometrii stosowanej do próby Charpy'ego. Jest to zatem niejako etap wstępny na drodze do opracowania magnetycznej metody diagnozowania bezpośrednio ścian reaktora.

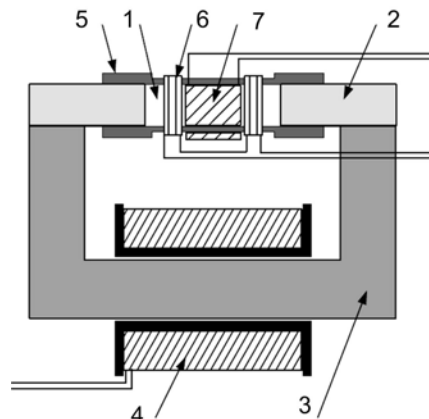
Próbki do testu Charpy'ego mają kształt prostopadłościanu (długość 55 mm i przekrój kwadratowy o krawędzi 10 mm, norma ASTM A370). Skuteczne magnesowanie takich próbek możliwe jest po zastosowaniu rdzenia z miękkiego magnetycznego materiału w kształcie litery C, zamykającego obwód strumienia indukcji magnetycznej. Źródłem strumienia indukcji w obwodzie może być ten rdzeń (wariant a) albo sama próbka (wariant b). Elementy te są magnesowane wówczas za pomocą cewki nawiniętej na rdzeniu lub za pomocą cewki otaczającej próbkę. Prąd płynący przez cewki magnesujące zmienia się w czasie zazwyczaj w sposób liniowy i przemienny (ze stałą szybkością narastania). Wykorzystuje się do tego źródła prądu sterowane napięciem. Ocena właściwości magnetycznych polega na analizie wybranych wielkości fizycznych charakteryzujących proces magnesowania. Przedstawione niżej cztery metody badań różnią się właśnie w doborze wielkości fizycznych. Metody te, dla potrzeb niniejszego opracowania, określono jako:

- 1) metoda pomiaru kolejnych pętli histerezy (*minor loops method*),
- 2) metoda adaptacyjnego doboru warunków magnesowania (*MAT method*),
- 3) metoda pomiaru efektu Barkhausena,
- 4) metoda jednoczesnego badania kilku wielkości magnetycznych (*3MA method*).

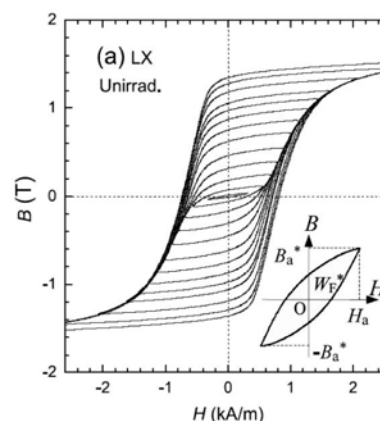
## Metoda pomiaru kolejnych pętli histerezy

Metoda ta jest proponowana przez laboratorium z Iwate University w Japonii [9]. Schemat blokowy układu magnesującego jest pokazany na rysunku 3. Próbka (1) wraz z prętami dystansowymi (2) i rdzeniem z miękkiej stali (3) tworzą obwód zamknięty dla strumienia indukcji. Rdzeń jest magnesowany przez cewkę (4). Karkas (5) stabilizuje położenie i osiowość próbki oraz prętów dystansowych. Napięcie indukowane w nawiniętych na nim dwóch cewkach (6) jest wykorzystywane do wyznaczenia zmian w natężeniu indukcji magnetycznej  $B$  wewnątrz próbki.

Płaska cewka (7) umieszczona tuż przy powierzchni próbki służy do wyznaczania zmiany natężenia pola

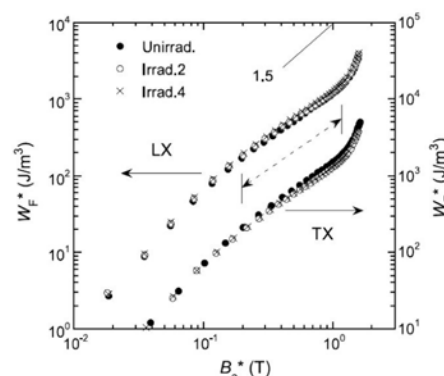


Rys. 3. Układ pomiarowy do metody A1, opis w tekście  
Fig. 3. The measuring system to the method of A1, the description in the text



Rys. 4. Kolejne pętli histerezy zmierzone w metodzie A1 oraz parametry tych pętli

Fig. 4. Following hysteresis loops measured in the A1 method and parameters of the loops

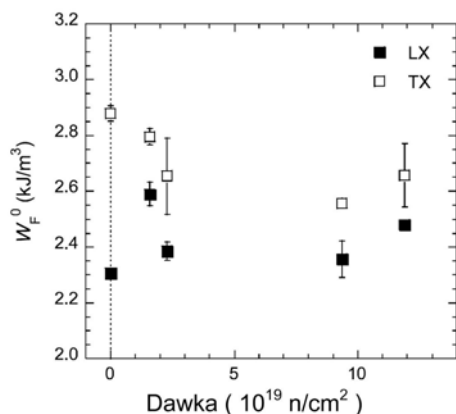


Rys. 5. Zależność parametru  $W_F^*$  pętli histerezy od amplitudy indukcji magnetycznej  $B_a$

Fig. 5.  $W_F^*$  parameter depending on the amplitude of the hysteresis loop of magnetic induction  $B_a$

magnetycznego  $H$  w tej strefie. Cytowane tu wyniki dotyczą próbek ze stali A533B (0,14% Cu), wyciętych wzdłuż kierunku walcowania blachy (LX) oraz prostopadłe (TX). Pętli histerezy  $B(H)$  wyznaczone dla stopniowo zwiększanej amplitudy prądu są pokazane na rysunku 4. Na tym rysunku naszkicowano też pętli histerezy i wskazano wyznaczone parametry.

W metodzie tej wyznaczana jest najpierw zależność powierzchni pętli histerezy – parametr  $W_F^*$  od amplitudy indukcji magnetycznej  $B_a$ . Widoczne na rysunku 5



Rys. 6. Zależność parametru  $W_F^0$  od dawki napromieniowania  
Fig. 6.  $W_{F_0}$  parameter depending on the dose of radiation

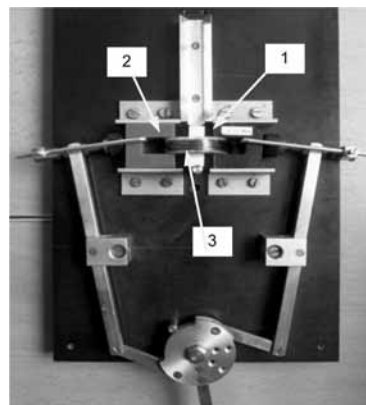
dwa zestawy wykresów tej zależności (dla obu kierunków walcowania) odpowiadają trzem stanom napromieniowania: 0 oraz  $0,2 \cdot 10^{19}$  i  $11 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. Jak widać, próbki wykazują się właściwościami anizotropowymi, zależnymi od kierunku magnesowania względem kierunku walcowania. Zauważyć też trzeba, że napromieniowanie nieznacznie zmienia wartość pola powierzchni pętli histerezy. Zależności z rysunku 5 aproksymowane są za pomocą empirycznej funkcji potęgowej typu  $W_F = W_F^0 (Ba/Bs)^n$ , gdzie Bs jest indukcją dla nasycenia. Wartość współczynnika  $W_F^0$  jest traktowana jako syntetyczny deskryptor właściwości magnetycznych. Wykres zależności tego współczynnika od dawki jest pokazany na rysunku 6 dla obu kierunków walcowania. Te zależności są źródłem informacji o zmianach we właściwościach danej stali. Często badane są tylko względne zmiany tego parametru w odniesieniu do stanu nienapromieniowanego.

## Metoda adaptacyjnego doboru warunków magnesowania

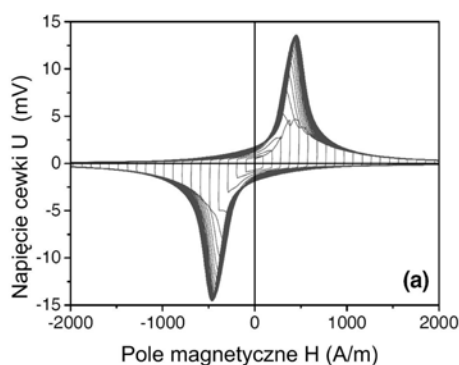
Metoda ta jest rozwijana w Institute of Physics Czeskiej Akademii Nauk w Pradze oraz w Institute of Technical Physics and Materials Science w Budapeszcie. Określana jest skrótem MAT od słów *Magnetic Adaptive Testing*.

Zdjęcie układu magnesującego pokazano na rysunku 7 [10]. Próbka (1) (połowa próbki Charpy'ego) jest zwarta obustronnie przez dwa rdzenie (2). Rdzenie te są przyciskane do próbki za pomocą widocznych dźwigni. Źródłem pola magnetycznego jest cewka magnesująca (3), otaczająca próbkę. Na tym samym karkasie jest nawinięta cewka detekcyjna. Natężenie prądu magnesującego zmienia się w sposób piłokształtny z amplitudą narastającą w kolejnych cyklach.

Przykład wykresu napięcia U indukowanego w cewce detekcyjnej w funkcji natężenia pola magnetycznego H wewnątrz cewki magnesującej pokazano na rysunku 8. Napięcie to jest miarą różniczkowej przenikalności magnetycznej  $-\mu$ . Takie sygnały rejestruje

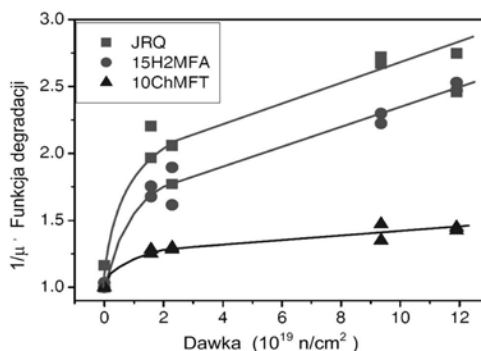


Rys. 7. Układ magnesowania dla metody adaptacyjnej  
Fig. 7. Magnetizing system for adaptive methods

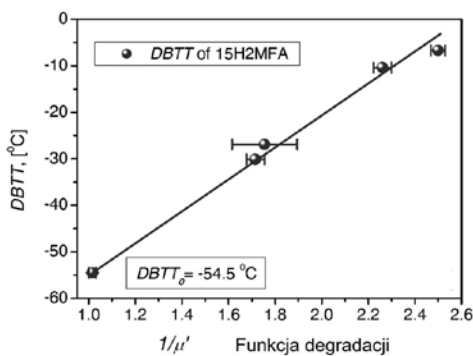


Rys. 8. Wykres napięcia indukowanego w cewce detekcyjnej w metodzie adaptacyjnej  
Fig. 8. Graph of voltage induced in the detection coil in the adaptive method

Fig. 8. Graph of voltage induced in the detection coil in the adaptive method



Rys. 9. Wartości funkcji degradacji dla trzech napromieniowanych stali  
Fig. 9. Degradation values as the functions for three irradiated steel



Rys. 10. Zależność temperatury przejścia od wartości funkcji degradacji  
Fig. 10. Transition temperature as a dependence from the value of the degradation function

Fig. 10. Transition temperature as a dependence from the value of the degradation function

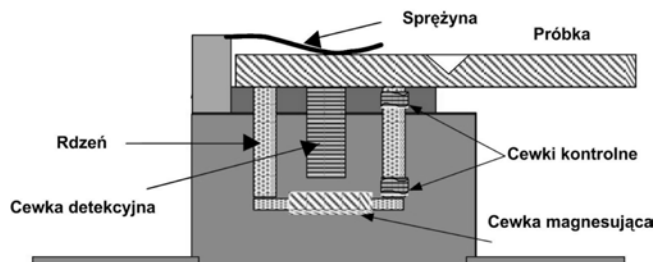
się dla próbek wzorcowych o systematycznie zmienionych właściwościach uzyskanych wskutek zadanego procesu degradacji (deformacja plastyczna, napromieniowanie). Analiza tych wszystkich wyników polega na porównaniu i wyborze wielkości fizycznej opisującej w sposób optymalny (z największą dynamiką) trend zmian wynikający ze wzrostu stopnia degradacji. Taką wielkością dla stali napromieniowanych okazuje się wartość odwrotności przenikalności magnetycznej.

Dla takiego parametru znajduje się następnie optymalną amplitudę magnesowania, to znaczy taką, dla której dynamika zmian jest największa i przy tych parametrach magnesowania wykonuje badania właściwe. Na rysunku 9 pokazano wynik analizy metodą MAT względnych zmian funkcji degradacji ( $1/\mu$ ) dla trzech stali w funkcji dawki napromieniowania. Widoczny jest monotoniczny i istotnie znaczący wzrost wartości tej funkcji. Kolejny wykres z rysunku 10 dowodzi, że uzyskano także bardzo satysfakcjonującą monotoniczną zależność pomiędzy wzrostem temperatury przejścia w stan kruchy a wartością przyjętej funkcji degradacji.

## Metoda pomiaru efektu Barkhausena

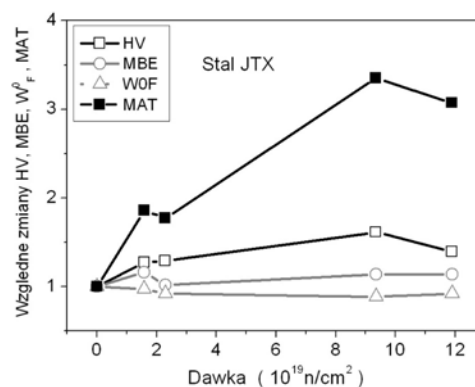
Efekt Barkhausena (EB) związany jest ze skokowym ruchem granic domen magnetycznych (GDM). Taki ruch wynika z odkotwiczenia GDM od defektów struktury podczas przemagnesowania materiału. Skoki GDM generują impulsy napięcia w cewce detekcyjnej zbliżonej do materiału. Wykres chwilowego natężenia tych impulsów w funkcji natężenia pola magnetycznego, a także wartość średnia tego natężenia charakteryzują dany materiał. Zaletą EB jest to, że można go badać na powierzchni elementu, stosując elektromagnes jarzmowy oraz cewkę stykową. Na rysunku 11 pokazano schemat układu pomiarowego EB dla próbek Charpy'ego, który jest stosowany w Energy Research Institute (Hungarian Academy of Sciences) w Budapeszcie [12]. Próbkę jest dociskana sprężyną do głowicy zawierającej elektromagnes jarzmowy oraz cewkę detekcyjną. Za miarę natężenia EB przyjęto wartość skuteczną (rms) sygnału napięciowego dla jednego okresu magnesowania.

Przykład zastosowania EB w diagnostyce efektów napromieniowania wzięto z referatu wygłoszonego na spotkaniu grupy UNMNDE na Słowacji [13]. Zreferowano tam wyniki badań porównawczych opisanych wyżej trzech metod. Zbadano kilka serii próbek napromieniowanych różnymi dawkami. Na rysunku 12 zestawiono wykresy ilustrujące wpływ napromieniowania na względne zmiany twardości (HV) oraz trzech wielkości magnetycznych (natężenie EB (MBE), współczynnik  $W_F^\circ$  (WOF) oraz wartość  $1/\mu$  (MAT)). Badania te dotyczyły stali typu JTX z zawartością 0,14% Cu. Jak widać, napromieniowanie skutkuje wyraźnym wzrostem twardości (ok. 150 %). Zmiany właściwości magnetycznych są bardzo zróżnicowane. Zwraca uwagę bardzo duży wzrost funkcji degradacji w metodzie MAT



Rys. 11. Układ pomiarowy służący do badania natężenia efektu Barkhausena dla próbek Charpy'ego

Fig. 11. The measuring system to study the intensity of Barkhausen effect in Charpy samples



Rys. 12. Zestawienie wyników badań twardości HV i trzech metod magnetycznych

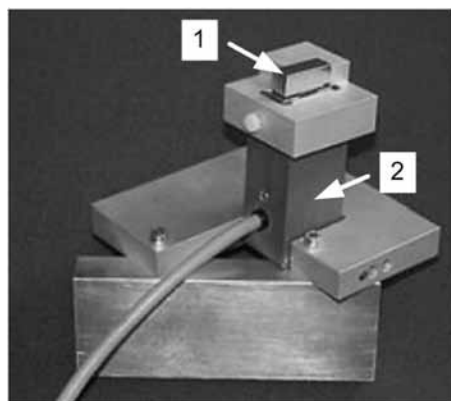
Fig. 12. Results of hardness HV and three magnetic methods

(ok. 300 %). Natężenie EB wzrasta o kilkanaście %, a wartość współczynnika  $W_F^\circ$  zmienia się w sposób niemonotoniczny, analogicznie jak w przypadku wyników pokazanych na rysunku 6.

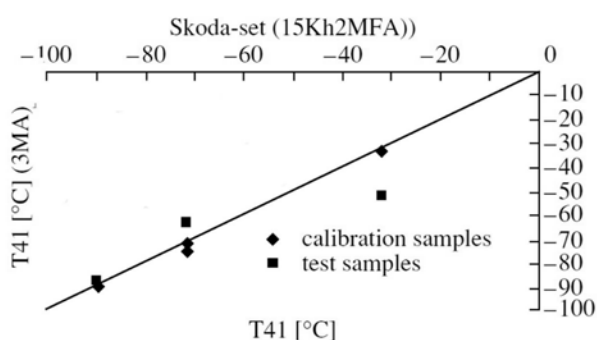
## Metoda jednoczesnego badania kilku wielkości magnetycznych – 3MA

Badanie jednoczesne kilku wielkości fizycznych związanych z procesem magnesowania promuje zespół naukowców z Fraunhofer-IZFP w Saarbrücken [8]. Opracowano tam sondę z elektromagnesem jarzmowym oraz kilkoma czujnikami. Schemat budowy elektromagnesu jest podobny do pokazanego na rysunku 11. Pomiędzy biegunami umieszczone są (w wersji podstawowej): 1) sonda Halla – do pomiaru natężenia składowej stycznej  $H_t$  pola magnetycznego przy powierzchni próbki, 2) cewka stykowa – do pomiaru natężenia EB lub (pośrednio) do pomiaru przenikalności magnetycznej materiału. W drugim przypadku cewka ta generuje pole przemiennie o niewielkim natężeniu. Wytwarzane w materiale prądy wirowe obciążają magnetycznie tę cewkę, tym bardziej, im większa jest przenikalność magnetyczna materiału. Mierzona jest wówczas oporność zespolona cewki. Przy badaniach materiałów napromieniowanych badania tej oporności

wykonuje się dla szeregu częstotliwości. Umożliwia to dodatkową ocenę zmian w poziomie przewodnictwa elektrycznego wynikającego z tworzenia się wydzielań. Składowa styczna  $H_t$  pola magnetycznego przy powierzchni próbki zależy od stanu namagnesowania



Rys. 13. Układ pomiarowy z sondą 3MA  
Fig. 13. The measuring system with 3MA probe



Rys. 14. Badania temperatury przejścia metodą 3MA  
Fig. 14. Transition temperature measurement by 3MA method

materiału. Przy magnesowaniu rdzenia prądem sinusoidalnym składowa ta zawiera wiele harmonicznych. Analiza fourierowska pozwala na wyznaczenie wartości współczynnika zniekształcenia  $W$ . Jest on tym większy, im bardziej nasycany jest materiał. Autorzy tego układu pomiarowego dali mu akronim 3MA, jako skrót nazwy Micromagnetic – Multiparameter – Microstructure – Analysis. Ta nazwa wynika z uzyskiwanych za pomocą tego układu ocen wielu właściwości badanego materiału związanych z mikrostrukturą, a także naprężeniami. Takie możliwości zapewnia analiza wyników badań kalibrujących, wykonanych dla serii próbek o zmieniającej się wybranej właściwości  $Y$  (np. twardości czy poziomu naprężeń wewnętrznych). Wyznaczane są współczynniki w liniowym równaniu opisującym zależność między poziomem właściwości  $Y_i$  a sumą wartości zmierzonych dla danej próbki wielu parametrów magnetycznych  $X_j$ .

Na rysunku 13 pokazano układ 3MA używany do badania temperatury przejścia ( $T_{41}$ ) [8].

Próbka (1) położona jest na części roboczej sondy (2). W tym przypadku jest to próbka już poddana próbie udarności. Na rysunku 14 przedstawiono rozkład wartości parametru temperatury  $T_{41}$  wyznaczonych podczas kalibracji metody (romby) oraz podczas badań testowych. Test ten wykonano dla stali 15Kh2MFA napromieniowanej w temperaturze  $288^{\circ}\text{C}$  dawkami neutronów o wartości ok.  $3 \cdot 10^{19}$  i  $10 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. Jak widać, metoda 3MA umożliwia ocenę poziomu temperatury  $T_{41}$ . Odchylenia od wartości faktycznych – szczególnie w zakresie dużych dawek, są zapewne wynikiem wykorzystania tylko trzech punktów kalibrujących. Nie wyznaczono odchyłeń standardowych tych ocen.

## Podsumowanie

Przedstawione informacje o opracowywanych aktualnie magnetycznych nieniszczących metodach badania próbek poddanych działaniu promieniowania neutronowego świadczą o dość zaawansowanym stanie technik umożliwiających takie badanie próbek używanych do prób udarnościowych Charpy'ego. Szczególnie dużą czułość na zmiany mikrostruktury wykazuje metoda zwana metodą adaptacyjną.

Zagadnieniem czekającym na rozwiązanie jest diagnostyka ściany reaktora. Podejmowane są próby wykorzystania fal akustycznych generowanych jako impulsy magnetostrykcyjne [14]. Należy oczekiwać, że niebawem będzie możliwe zweryfikowanie użyteczności diagnozowania materiałów konstrukcyjnych reaktora za pomocą rozwijanej w Politechnice Gdańskiej metody emisji magnetoakustycznej.

## Literatura

- [1] Tipping P.G.: Understanding and mitigating aging in nuclear power plants. Woodhead Publishing, 2010.
- [2] Wojas M.: Badania nieniszczące w energetyce jądrowej. 40 KKBN, Warszawa, 20011, R01.
- [3] Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych, 4 Konferencja Naukowo-Techniczna, Politechnika Gdańska, 2012, CD ISBN 93-919502-7-1.
- [4] <http://www.ndesrc.eng.iwate-u.ac.jp/UniversalNetwork/html/Event/summary2nd.html>.
- [5] Odette G.R., Lucas G.E.: Embrittlement of nuclear reactor pressure vessels, JOM, 53 (7) (2001), 18-22.
- [6] Hernandez-Mayoral M., Caturla M.J.: Microstructure evaluation of irradiated structural materials in nuclear power plants, w [1], 189-235.
- [7] Kobayashi S., Takahashi S.: Current understanding of magnetic property changes in neutron irradiated NRPV steels, UNMNDE meeting, Tatranské Matliare, Slovakia, 4-5 IX, 2012.

- [8] Dobmann G., Altpeter I., Kopp M.: Nondestructive Materials Characterization of Irradiated Nuclear Pressure-Vessel Steel Samples by the Use of Micromagnetic Techniques and in Terms of Mechanical properties; Russian Journal of Nondestructive Testing, 42 (2006) 272-277.
- [9] Kobayashi S., Gillemot F., Horvath A., Szekely R.: Magnetic properties of a highly neutron-irradiated nuclear reactor pressure vessel steel, J. Nucl. Mater. 421 (2012), 112-116.
- [10] Tomáš I., Vértesy G., Gillemot F., Székely R.: Nondestructive Magnetic Adaptive Testing of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steel Degradation, J. Nuclear Materials, (2012), zaakceptowany do druku.
- [11] Tomáš I., Vértesy G.: Magnetic Adaptive Testing, w Nondestructive Testing Methods and New Applications, <http://www.intechopen.com/articles/show/title/magnetic-adaptive-testing>.
- [12] Barroso S.P., Horváth M.F., M., Horváth Á., Richard S., Gillemot F.: Correlation among mechanical and physical properties for assessment of radiation damage on nuclear reactor materials; Magnetic Measurements'12, Tatranské Matliare, Slovakia, 2012.
- [13] Tomáš I., Vértesy G.: Comparison of different nondestructive magnetic measurement, performed on irradiated reactor steel samples; UNMNDE meeting, Tatranské Matliare, Slovakia, 4-5 IX, 2012.
- [14] Dobmann G.: Non-Destructive Testing for Ageing Management of Nuclear Power Components, w: Nuclear Power – Control, Reliability and Human Factors, P. Tsvetkov, Intech (2011), <http://www.intechopen.com/articles/show/title/non-destructive-testing-for-ageingmanagement-of-nuclear-power-components>.

[www.pspaw.ps.pl](http://www.pspaw.ps.pl)

przegląd  
**SPAWALNICTWA**

## Roczny spis treści 2012

### Metalurgia

strona / zeszyt

**Bański Robert, Rozumek Dariusz\***

Rozwój pęknięć zmęczeniowych w bimetalach stal-tytan wykonanych metodą zgrzewania wybuchowego (platerowania) ..... 9/4

**Fydrych Dariusz\***

Pękanie zimne stali spawanej w środowisku wodnym ..... 49/10

**Kozak Tomasz\***

Odporność na zimne pękanie złączy spawanych ze stali P460NL1..... 7/7

**Łomozik Mirosław, Pilarczyk Adam\***

TPF 3.0 do tworzenia wykresów przemian fazowych austenitu w stalach w warunkach spawalniczych CTPC-S ..... 23/3

**Pawłowski Bogdan, Krawczyk Janusz, Bała Piotr, Parzych Sławomir\***

Analiza przyczyn pęknięć w złączu rura-zwornik w rurach płuczkowych w wiertnictwie ..... 42/6

**Zbroja Paweł, Ziewiec Aneta, Tasak Edmund\***

Skłonność do pęknięć gorących austenitycznej stali Super 304H przeznaczonej do pracy w podwyższonej temperaturze ..... 10/1

**Ziewiec Aneta, Pańcikiewicz Krzysztof, Tasak Edmund\***

Pękanie spoin w stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) w czasie spawania, uruchamiania i eksploatacji bloków energetycznych ..... 2/5

**Białucki Piotr, Lange Artur, Miazga Krzysztof**

Spawanie orbitalne rur cienkościennych ze stali 316L ..... 33/10

**Gawrysiuk Wojciech, Troszka Adam\***

Techniczno-ekonomiczne aspekty spawania wiązką laserową rur ozebrowanych w kotłach energetycznych ..... 8/5

**Jachym Robert, Kwieciński Krzysztof, Łomozik Mirosław, Urzyncok Michał\***

Spawanie złączy doczołowych jedno- i różniamiennych ze stali Tempaloy A-3 ..... 45/4

**Mikno Zygmunt, Bartnik Zbigniew, Lange Artur, Sikorski Mirosław\***

Wybrane aspekty zgrzewania garbowego blach stalowych w obliczeniach MES ..... 65/10

**Mirski Zbigniew, Różański Maciej, Winiowski Andrzej\***

Lutowanie dyfuzyjne tytanu przy użyciu przekładek z miedzi i niklu ..... 15/10

**Mirski Zbigniew, Śpiewak Kamil\***

Spawanie laserowe mechanizmu siedzenia samochodowego ..... 2/7

**Pańcikiewicz Krzysztof, Kwiecień Sławomir, Tasak Edmund\***

Właściwości połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) po obróbce cieplnej ..... 15/1

**Pfeifer Tomasz, Kiszka Agnieszka\***

Spawanie blach dla przemysłu motoryzacyjnego metodą MAG ze zmienną biegunowością (AC Pulse)..... 49/2

**Prązmowski Mariusz, Paul Henryk\***

Charakterystyka bimetali cyrkon-stal zgrzewanych wybuchowo przy różnych parametrach procesu ..... 15/4

**Zhang Zhuyao, Holloway Graham, Marshall Adam\***

Właściwości materiałów dodatkowych do spawania stali P92 stosowanych do budowy bloków na parametry supernadkrytyczne ..... 35/4

**Turyk Eugeniusz, Ciepły Marcin, Pęcherek Mirosław, Potrzebski Marek,**

**Kuzio Tadeusz, Czwońnog Bogusław, Żydzik-Białek Agnieszka, Bormann Margrit, Jastrzębiowski Andrzej\***  
Spawanie laserowe w naprawie napisu ARBEIT MACHT FREI z bramy głównej byłego obozu Auschwitz I ..... 37/3

### Spajanie

strona / zeszyt

**Ambroziak Andrzej, Białucki Piotr, Derlukiewicz Wiesław, Lange Artur, Dudkiewicz Paweł\***

Wpływ liczby napraw na właściwości złączy spawanych ze stali drobnoziarnistych ..... 36/10